Teóricos 1992.

Taxonomía

CIPFE - CED Orione Cont. Biol. Publicación Especial No. 3, 1985.
1-10 pgs.

LA EVOLUCION: UN JUEGO ECOLOGICO

Aplicación de la teoría de los juegos a la evolución orgánica

Jorge V. Crisci

Div. Plantas Vasculares, Museo de La Plata, Paseo del Bosque s/n, 1900 La Plata, Argentina; Carrera del Investigador Científico, CONICET.

Lanzada en 1944 por el matemático Von Neumann y el economista Morgenstern, la teoría de los juegos es una mezcla especial de matemática, técnica, economía y estrategias que, al igual que las teorías de la información y de la catástrofe, probablemente se transforme en un instrumento valioso para la biología.

1. Introducción

La palabra "evolución" denota cambio con continuidad, normalmente con un componente direccional. La evolución orgánica se define como el cambio en la diversidad y adaptación de las poblaciones de organismos.

La teoría de la evolución orgánica por medio de la selección natural, propuesta hace más de 120 años por Darwin y posteriormente modificada por la genética, es la herramienta conceptual que permite explicar y comprender los mecánismos y modalidades de la evolución de los seres vivos.

El punto de vista actual sobre la evolución orgánica (Lewontin, 1978) es que el ambiente plantea ciertos "problemas" que los organismos necesitan "resolver" y que la evolución a través de la selección natural constituye el mecanismo para crear dichas "soluciones". La adaptación es el proceso del cambio evolutivo mediante el cual las poblaciones de organismos procuran, aunque no siempre lo consiguen, una "solución" al "problema".

Para ejemplificar esta idea tomemos el clásico caso de la polilla del abedul, ***Biston betularia***, de Inglaterra. Esta especie es, o era, de color claro. Tiene hábitos nocturnos, durante el día se posa en los troncos de los árboles donde por su color se confunde con los líquienes y pasa por lo tanto inadvertida. Ocasionalmente, aparecían ejemplares oscuros, que inmediatamente llamaban la atención de los pájaros predatores de polillas, pues eran evidentes sobre los líquenes de los árboles. En 1850 estos ejemplares oscuros constituían el 1 % del total de individuos de cualquier población. La industria, que en la mitad del siglo pasado comenzó a prosperar, ennegreció con hollín los alrededores de los centros industriales, incluyendo los árboles. Esto trajo consecuencias negativas para las polillas claras que pasaron a ser muy evidentes para los pájaros. En 1900, las poblaciones de polillas de los alrededores de centros industriales estaban constituidas en un 99 % por polillas oscuras.

Este cambio en las frecuencias de polillas oscuras y claras se considera como un proceso de adaptación mediante el cual las poblaciones de la polilla del abedul "solucionaron" el "problema" de vivir sobre troncos con hollín. Pero no hay punto final para la adaptación; habiéndose adaptado a la vida sobre superficies oscuras, algunas poblaciones de regiones donde el problema de la contaminación ha sido superado, han invertido el proceso, las polillas claras han vuelto a ser mayoría (2).

Ante este tipo de hechos, la metáfora de un juego ecológico entre los organismos y su ambiente surge inmediatamente, y no pocos autores han considerado la posibilidad de describir la interacción entre los mismos en términos de la teoría de los juegos (e.g.: Lewontin, 1961; Slobodkin, 1964, 1968; Toledo, 1972; Slobodkin y Rapoport, 1974; Harsell, 1980).

La teoría de los juegos es una sección de la matemática, que estudia las estrategias a seguir en situaciones de conflicto. Sin pretender definir rigurosamente lo que es una situación de conflicto, me limitaré a señalar que se originan cuando un grupo de "jugadores" cuyos intereses son diferentes, actúan sobre un mismo proceso.

La interacción de los organismos con su ambiente, puede representarse como un juego no antagónico (donde los intereses de los participantes no son necesariamente contrarios, aunque si diferentes) entre dos jugadores: los organismos por un lado y la Naturaleza por el otro.

Los objetivos de este trabajo son:

1) delinear un marco teórico para la aplicación de la teoría de los juegos a la evolución orgánica;
2) diseñar un modelo mecánico que, basado en la teoría de los juegos, simule los principales proceso evolutivos y ecológicos de la evolución orgánica (3).

Esta contribución está dirigida, en un principio, a estudiantes de biología en un intento por facilitarles la comprensión del fenómeno evolutivo. Asimismo, no descarto que biólogos con una formación más avanzada encuentren en la analogía presentada elementos de utilidad para sus propias investigaciones.

2. Teoría de la evolución

Escapa a mi objetivo una presentación detallada de la teoría de la evolución, pero es necesario una breve introducción a los aspectos fundamentales, en especial aquellos que estarán representados por el modelo mecánico.

La teoría puede resumirse en siete puntos (Grant, 1977; Stebbins, 1978; Dobzhansky et al. 1980).

1) El cambio evolutivo es un fenómeno principalmente de las poblaciones de organismos (4).
2) La reproducción en las poblaciones de organismos produce poblaciones descendientes similares a las poblaciones parentales.
3) Los potenciales reproductivos de una población parental siempre exceden grandemente el número real de sus descendientes.
4) Una población siempre presenta variación entre sus miembros. La mayor parte de esta variación es transmitida a los descendientes.
5) Es posible que aparezcan novedades evolutivas o mutaciones y que sean transmitidas a la descendencia.
6) El espacio y los recursos del ambiente son limitados, por lo tanto existe la competición inter e intrapoblacional. Individuos con características mejor adaptadas a un ambiente en particular tenderán, en ese ambiente, a dejar más descendientes que aquellos individuos menos adaptados.
7) Los ambientes varían en el tiempo y en el espacio. En una población las variaciones hereditarias que funcionan bien en un determinado ambiente serán seleccionados favorablemente en el mismo. Por lo tanto, las poblaciones divergerán y se diferenciarán a medida que se vayan adaptando a diferentes modos de vida en diferentes condiciones ambientales.

Los cambios evolutivos se deben principalmente a cuatro tipos básicos de procesos: **mutación, recombinación génica, selección natural** y **aislamiento reproductivo**. Los dos primeros causan la variabilidad genética sin la cual no pueden ocurrir cambios, la selección natural y el aislamiento reproductivo dirigen las poblaciones de organismo hacia diferentes canales adaptativos.

Además, dos procesos accesorios ejercen influencia sobre la operaciónde los cuatro procesos básicos: la **migración** de individuos de una población a otra y la **hibridación** entre poblaciones emparentadas.

Finalmente, los efectos del azar en sus muchas formas (por ejemplo, el origen azaroso de las mutaciones) influyen sobre los mecanismos del cambio evolutivo.

A continuación describiremos, pero muy brevemente, los procesos anteriormente mencionados.

Mutación: una mutación es un cambio o "error de copia" del ácido desoxirribonucleico constituyente de los genes y de efecto permanente en el material hereditario. Las mutaciones son sucesos accidentales (= no dirigidas o aleatorias), pues se producen con independencia de si son o no adaptativas en el medio en que viven los organismos. Las tasas de mutación varían enormemente, pero en una estimación prudente, podemos decir que uno de cada 10 individuos de una población es portador de un gen recién mutado.

Recombinación genética: en los hijos se encuentran combinados genes de ambos padres. Este hecho se debe principalmente a la reproducción sexual. Además existe otro fenómeno que contribuye a la recombinación y es el denominado "crossing over" o entrecruzamiento cromosómico en la meiosis, donde cromosomas homólogos intercambian trozos entre sí.

Estrictamente hablando la recombinación genética no es una fuerza que cambie la frecuencia de genes en la población pero sí produce nuevas combinaciones de genes que pueden (o no) ser más adaptativos que las otras.

Selección natural: A la totalidad de los genes que un individuo recibe de sus progenitores se lo denomina genotipo. Ese genotipo en interacción con el ambiente producirá el fenotipo, que son las características o rasgos del individuo. Los diferentes fenotipos poseen distinta capacidad de supervivencia y/o reproducción en el ambiente en que viven. Este fenómeno produce una perpetuación diferencial de los respectivos genotipos.

La selección natural es un cambio en la frecuencia relativa de los genotipos debido a la diferente habilidad de sus fenotipos para obtener representación en la siguiente generación.

El concepto de "habilidad para obtener representación en la siguiente generación", no es absoluto sino relativo, ya que esa habilidad debe ser siempre definida dentro de un explícito contexto ambiental. Un determinado fenotipo puede ser muy "exitoso" bajo determinadas condiciones ambientales y poco adaptado o sea, con escasa "habilidad para obtener representación en la siguiente generación", en otras condiciones ambientales.

Aislamiento reproductivo: como los ambientes son muy complejos y diversos en las dimensiones espacio y tiempo, las interacciones organismos-ambiente son siempre diferentes incluso hasta para poblaciones emparentadas, que viven en localidades distintas. A veces poblaciones emparentadas divergen evolutivamente de tal manera, que disminuyen o bloquean la capacidad de cada una de ellas para intercambiar genes con las otras. A estos impedimentos del intercambio de genes entre poblaciones se los denomina mecanismos de aislamiento reproductivo.

Migración: Una población puede adquirir un nuevo gen ya sea por una mutación que ocurre en un individuo de la misma o por inmigración y cruzamiento de un individuo de otra población que posee en su genotipo el gen en cuestión. A esta forma de incorporación de material génico a una población se la denomina migración.

Hibridación: A veces dos poblaciones adaptadas a diferentes condiciones ambientales y que poseen mecanismos de aislamientos reproductivos entre ellas pueden ocasionalmente intercambiar genes. En evolución, este cruzamiento entre poblaciones con diferentes complejos de genes adaptativos se los denomina hibridación.

Para obtener un mayor grado de fidelidad en cualquier intento de representar los procesos anteriormente definidos, debemos tener en cuenta el contexto ecológico de los mismos.

3. El contexto ecológico del cambio evolutivo

Como resultado de los procesos de la evolución orgánica, muchas de las características de los organismos vivos son adaptaciones al ambiente en que viven. El ambiente es generalmente imaginado como un conjunto de variables, que afectan el estado fisiológico, la supervivencia o la reproducción de los organismos, tales como clima, suelo, agua, etc. Sin embargo, también debe incluirse como ambiente a otras especies (predatores, presas, patógenos, etc.) e incluso individuos de la misma especie. Ambiente, por lo tanto, son todos aquellos factores que influyen sobre cualquier tipo de actividad de los organismos.

A continuación definiré cinco conceptos ecológicos que estarán representados en el modelo mecánico (un tratamiento exhaustivo del tema puede hallarse en Boughey 1973, Solbrig y Solbrig, 1979).

Habitat y nicho ecológico. El habitat de un organismo es el lugar donde vive. El nicho ecológico es un término más amplio, que incluye no sólo el espacio físico ocupado por un organismo, sino también sus rangos ambientales, es decir, su posición en los gradientes ambientales de temperatura, humedad, p.H., suelo, competencia con otras especies, y todas las otras condiciones de existencia.

Limitaciones del crecimiento poblacional. En cualquier localidad la densidad y persistencia de una población depende de su capacidad para incrementar su número de miembros y de los factores ambientales que limitan su abundancia.

Capacidad de carga del ambiente. En teoría, poblaciones con una gran capacidad de incrementar su número (por ejemplo bacterias) producirían en condiciones favorables tal número de individuos que cubrirían la tierra por completo en pocos días. Sin embargo, eso no sucede ya que el ambiente impone un límite a la abundancia, debido al agotamiento del alimento y/o del espacio. Al número máximo de individuos de una misma población que pueden vivir en un ambiente determinado se lo denomina capacidad de carga del ambiente.

Competencia. La activa demanda por dos o más organismos de un mismo recurso vital se la denomina competencia. La competencia puede ocurrir entre miembros de la misma especie o entre individuos pertenecientes a distintas especies.

4. Teoría de los juegos: aspectos fundamentales

El matemático John Von Neumann comienza a desarrollar la teoría de los juegos durante la década del veinte, antes de esto el matemático francés Borel concibió algunas ideas sobre el tema. Pero, la teoría adquiere importancia a partir de la publicaciónen 1944 del libro ahora clásico, "Teoría de juegos y comportamiento económico" de Von Neumann y el economista Oskar Morgenstern.

Las aplicaciones de esta teoría no se limitan a la economía; los efectos se han hecho sentir en las ciencias políticas, matemáticas puras, psicología, finanzas y estrategias en situación de guerra (Schelling, 1960; Davis, 1971).

La teoría es compleja desde el punto de vista matemático, tanto como para no poder ser presentada en su totalidad en un artículo. Pero para nuestro objetivo lo importante no son los detalles de la teoría, sino la lógica subyacente, de la que podemos dar una idea aproximada a partir de varios ejemplos simplificados.

La teoría de los juegos trata las estrategias a seguir en situaciones caracterizadas, al menos en parte, por la existencia de un cierto conflicto de intereses entre dos o más jugadores. La palabra jugador no tiene exactamente el significado que podría esperarse. No es necesario que un jugador sea una persona, puede ser también un equipo, una corporación, una nación, un grupo de organismos, etc.

La mencionada teoría es aplicable a diferentes tipos de conflictos que reciben el nombre técnico de "juegos". Los juegos de entretenimiento corrientes, tales como el poker, el ajedrez o el fútbol, caen dentro de la definición técnica de juego, ya que constituyen ejemplos concretos de conflictos formalizados.

Los elementos que están contenidos en todas las situaciones incluidas en el análisis de la teoría de los juegos son los siguientes:

1) grupo de participantes ("jugadores");
2) conflicto de intereses entre ellos;
3) conjunto de reglas;
4) estrategias;
5) rédito (= algo de valor que el jugador gana o pierde).

En un juego siempre existe un conflicto de intereses entre dos o más partes llamadas jugadores. En determinados momentos cada una de las partes puede elegir entre varias posibilidades que vienen determinadas por ciertas reglas. El conjunto de decisiones posibles en todas las contingencias posibles del juego son las estrategias. La existencia de estrategias hace que, a pesar que todos jueguen bajo las mismas reglas, existan jugadores mejores que otros. El resultado final de un juego representa la suma de todas las decisiones hechas por cada uno de los jugadores y determina los réditos para cada uno de ellos.

Las reglas pueden ser consecuencias de un acuerdo común (juegos de entretenimiento) o simplemente restricciones impuestas por la situación de conflicto.

Para ejemplificar estos elementos tomemos dos juegos de entretenimiento: el poker y el ajedrez. Esta elección no implica que dichos juegos sean mejores situaciones de conflicto que cualquier otro tipo de situación.

En el ajedrez, el conflicto de intereses radica en el deseo de vencer de ambos jugadores. Para cada jugador las estrategias posibles están dadas por todos los movimientos que puede realizar de acuerdo con las reglas preestablecidas. El resultado está determinado por todos los movimientos de los dos jugadores y el rédito reside generalmente, en la satisfacción o insatisfacción psicológica

de los mismos. En el poker, la situación es muy semejante, pero no exactamente igual. Las elecciones posibles, en cada situación, son intervenir o no en el juego, determinar el número de cartas a pedir (en el caso que se pida alguna), apostar o no y en qué cantidad, etc. El resultado de cada mano es la designación de uno de los jugadores como ganador y los réditos residen generalmente, en el dinero ganado o perdido.

Entre el póker y el ajedrez existe otra diferencia importante. En una partida de poker hay un jugador extra (invisible) que hace una elección al principio de cada mano pero que no está interesado en el juego y no recibirá ninguna ganancia. Dicho jugador es el azar y su elección se realiza entre las aproximadamente 16^{68} formas diferentes en que pueden quedar las cartas después de haber sido barajadas. El azar ya no vuelve a intervenir durante el juego, todo lo que suceda dependerá de los jugadores y de nadie más.

Algunos juegos tienen reglas pero no tienen estrategias, por ejemplo el juego de cartas llamado "guerra", generalmente jugado por niños. En el mismo el mazo de cartas se divide en dos conjuntos. Luego cada jugador toma uno de ellos, y en cada jugada toma una carta de su conjunto en el orden en que están, y la enfrenta con la que el otro jugador toma del suyo en las mismas condiciones. La carta mayor gana la mano, y el jugador que la posee se queda con ambas cartas. El final del juego llega cuando un jugador (el perdedor) queda sin cartas.

Finalmente, cabe señalar que a través de la observación de la participación de los jugadores en el desarrollo de un juego, es posible determinar sus reglas sin conocimiento previo de las mismas. Por ejemplo, la posibilidad de observar una serie de partidas de ajedrez, nos permitiría determinar que existe una serie limitada de movimientos para cada una de las piezas, y así reconstruir las reglas que lo rigen.

Esta conclusión implica que, potencialmente, estamos en condiciones de analizar, en términos de teoría de los juegos, el juego entre los organismos y su ambiente.

5. La población: un Ulises biológico

La interacción de los organismos con su ambiente es extremadamente compleja y se asemeja a una suerte de juego ecológico. Apliquemos entonces la teoría de los juegos a la ecología evolutiva.

Los jugadores son dos: la Naturaleza y los organismos (5). La unidad de acción de los organismos es la población. En este tipo de juego los intereses de los jugadores no son necesariamente antagónicos, un participante (la población) hace jugadas "personales" y el otro (la Naturaleza o mejor dicho el ambiente) aleatorias (6). Una jugada "personal" es aquella que efectúa un jugador en base de apreciaciones del pasado y teniendo en cuenta el estado que guarda el juego en el presente; mientras que una jugada aleatoria es aquella en la que el azar es el factor determinante (Pospielov, 1967).

La interacción población-ambiente es un juego con estrategias y donde también interviene el azar. Las estrategias para la población son las posibles propiedades emergentes de la misma; por ejemplo reproducción sexual o asexual, polimorfismo genético o adaptación fisiológica individual, etc. Las acciones posibles de la Naturaleza son los diversos ambientes a los que debe adaptarse la población.

En el juego población-ambiente sólo la población obtiene réditos, ya que la Naturaleza elige pero no tiene pérdidas ni ganancias. Un punto crítico de nuestra analogía es, cómo definir el rédito, o sea, ¿cómo evaluar el triunfo de una población ante su medio?

Esta pregunta puede responderse indirectamente, como lo propuso Slobodkin (1964, 1968, 1974, este último con Rapoport). Huizinga (1950) en un ensayo histórico sobre el papel del juego en la cultura humana, señaló el hecho de que los juegos se llevan a cabo en un área determinada; por ejemplo, el fútbol, en un campo de juego, el ajedrez en un tablero, una guerra en una región geográfica específica, etc. Dentro de este ámbito o región: las únicas reglas que se aplican son las del juego. A la terminación del mismo, hay una distribución de "premios" y "castigos" y los jugadores abandonan el área. El valor de los réditos no reside en el área de juego sino en el mundo exterior a ésta. Todo juego tiene un lugar más allá de su área donde las ganancias se materializan.

Las poblaciones de organismos en su juego con el ambiente carecen de un área limitada. El juego se mantiene en todo lugar y en todo momento en los que la población se encuentra. No existe, por lo tanto, ningún rédito exterior al juego mismo, la muerte es la única situación que permite abandonar el juego, además de perderlo. Como lo señaló Slobodkin (1964) si la ecología evolutiva es un juego, sería la clase de juego que Kafka o Sartre hubieran inventado, ya que es un juego existencial donde el único rédito es su continuación.

¿Cómo debería jugarse un juego puramente existencial, en el cual todo está subordinado a la persistencia? ¿Cuál sería la mejor estrategia en tal tipo de juego?

Hay algo seguro, la medida del éxito evolutivo de una población está dada por la duración del juego. Por lo tanto, cualquier "estragegia óptima", será la que tienda a maximizarla. Un jugador que quiere maximizar su permanencia en el juego debe minimizar sus pérdidas en cada jugada.

Slobodkin y Rapoport (1974) han demostrado que las poblaciones se comportan ante eventos ecológicos de tal forma que minimizan sus pérdidas en la reocurrencia de dichos eventos.

Tomemos el ejemplo de la polilla del abedul: el evento ecológico es la aparición del hollín y la consecuente visibilidad de las polillas claras por parte de los predatores. La población responde con un aumento en la proporción de polillas negras. Aumento cuya primera consecuencia es la disminución de las pérdidas de integrantes de la población.

La reciente desaparición del hollín constituye otro evento ecológico, ante el cual las poblaciones afectadas, responden con un aumento de la proporción de polillas claras.

No siempre las poblaciones están en condiciones de disminuir las pérdidas en la reocurrencia de un evento ecológico. En ese caso, si el evento persiste los suficiente el resultado es la extinción de la población.

Queda en claro que la estrategia óptima es la de minimizar las pérdidas en cada generación. Sin embargo, no es posible establecer cuáles propiedades de los organismos son estrategias óptimas bajo todas las condiciones ambientales. Incluso, características tales como abundancia, salud, longevidad son sólo de valor contingente, es decir, son estrategias óptimas en muchos ambientes pero no en todos.

Esta situación es un paralelo con la historia de Ulises como la contó Homero, ya que "el varón de multiforme ingenio", lo era porque sus estrategias eran múltiples y la elección de una de ellas estaba siempre condicionada por las circunstancias.

A la luz de las consideraciones que he estado esbozando podemos reunir la teoría de los juegos y la teoría de la evolución y construir sobre la base de ello una representación analógica de los procesos evolutivos.

6. Un modelo mecánico del juego evolutivo

Un modelo analógico es cualquier objeto material, sistema o proceso destinado a reproducir de la manera más fiel posible, en otro medio, la estructura o trama de relaciones del original.

El uso de modelos en Biología ha permitido llegar a entender una multitud de procesos y fenómenos naturales que por su enorme complejidad y por la gran cantidad de variables que comprenden, no es posible estudiarlos en la naturaleza. En el caso de la evolución el tratamiento a partir de la teoría de los juegos facilita su manipulación y su entendimiento. Por consiguiente, me ha parecido provechoso crear un modelo mecánico de los procesos evolutivos.

Antes de describir el modelo, establezcamos los elementos representacionales fundamentales. Comencemos por un plano inclinado al que consideraremos nuestro medio ambiente (Fig. 1), donde transcurre el juego. El límite superior del plano inclinado es el punto de nacimiento de los organismos y el límite inferior la reproducción; o sea que la recorrida por un organismo del plano inclinado desde el límite superior al inferior implica el nacimiento y la vida de ese organismo hasta el momento de la reproducción. Al llegar al límite inferior el organismo se reproduce, es decir, tiene derecho a colocar dos organismos similares a él en el punto de nacimiento (Fig. 2).

Los organismos están representados por esferas que se desplazan desde el límite superior al inferior. La velocidad con que esas esferas-organismos recorren el plano inclinado representa la velocidad de reproducción. Una bacteria, por ejemplo, debe estar representada por una esfera que recorre el plano inclinado a una velocidad muchas veces superior a la que representa un insecto.

Supongamos ahora, que en nuestro plano inclinado aparecen obstáculos que retrasan o impiden la llegada al límite inferior a determinadas esferas, ya sea porque pasaron por ese sector o porque son incapaces, por su características, de eludir el obstáculo (Fig. 3).

Los obstáculos representan a los siguientes de la selección natural y son de dos tipos: los letales (aquellos que impiden la llegada al límite inferior) y los no letales (aquellos que retrasan la llegada al límite inferior, es decir, modifican la velocidad de reproducción).

Un obstáculo letal podría ser un orificio donde la esfera cayera; uno no letal podría ser un clavo donde la esfera desvíe su curso y cambie por lo tanto su velocidad de trayectoria.

La presencia de obstáculos implica un cambio en la probabilidad de superviviencia (continuar en el juego) de las esferas. Algunas bajarán su probabilidad de supervivencia debido a la incapacidad de superar un determinado obstáculo.

Al ancho del límite inferior del plano inclinado lo consideraremos como la representación de la capacidad de carga del ambiente (Fig. 4) o sea que ese límite inferior no es infinito en su capacidad de permitir reproducirse a las esferas. A pesar que una esfera logre recorrer la trayectoria entre límite superior-límite inferior no se reproduce si no logra "tocar" el límite inferior; si se apoya en otra esfera que en esa generación tocó antes el límite inferior, se la considera muerta. Este modelo implica que una mayor velocidad de reproducción es una característica favorable de la esfera, lo que no siempre es cierto en la realidad.

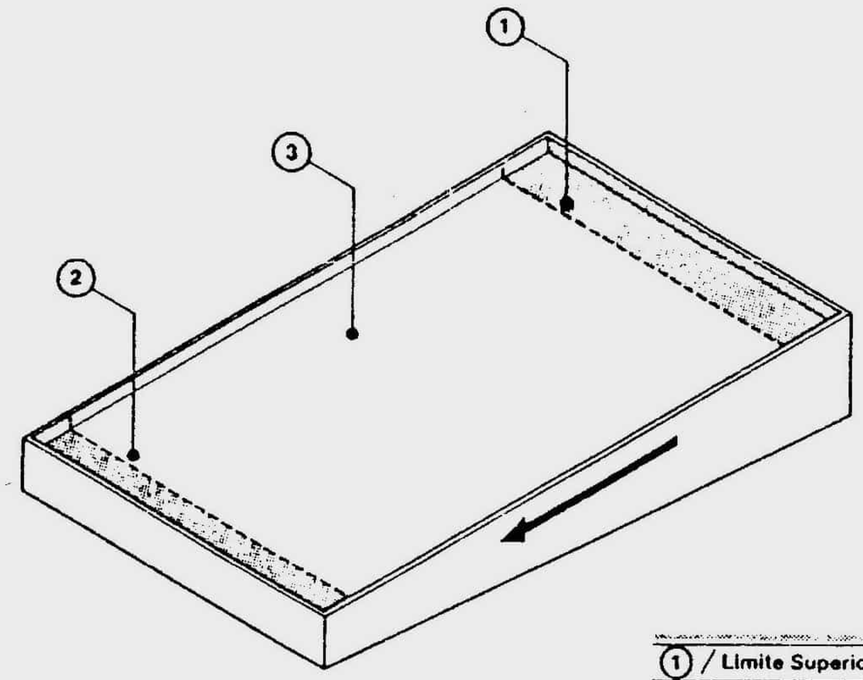
Ahora imaginemos que tenemos una población heterogénea genéticamente, y que esa heterogeneidad está representada por el color, tamaño y material de las esferas (Fig. 5).

El medio ambiente de esa población es el plano inclinado con sus obstáculos. Imaginemos que esos obstáculos son selectivos, una suerte de "predatores" de determinadas esferas. Por ejemplo, obstáculos representados por agujeros de tamaño pequeño se "tragarán" las esferas pequeñas que pasen por su área y permitirán el paso de las más grandes. Si analizamos esta situación desde el punto de vista de la teoría de los juegos: la población tendrá a "reducir" las pérdidas (= muertes antes de la reproducción) en cada jugada, o sea prolongar el juego, minimizando las pérdidas en la reocurrencia del fenómeno.

Supongamos que tenemos 10 esferas de las cuales 5 son grandes y 5 pequeñas, la capacidad de carga del ambiente es 20 esferas y los obstáculos impiden el paso en determinado sectores a las pequeñas. En cada jugada las grandes tienen mayor probabilidad de llegar a reproducirse, por lo tanto, la proporción irá cambiando en favor de las mismas, que luego de varios recorridos serán la mayoría (nunca más de 20) en la población. Es decir, la población se encontró frente a un evento "ecológico" que perjuidica la supervivencia de las esferas pequeñas. La respuesta del jugador-población es el aumento de la proporción de esferas grandes en el total de la población. De esa manera, disminuye las pérdidas de la próxima jugada.

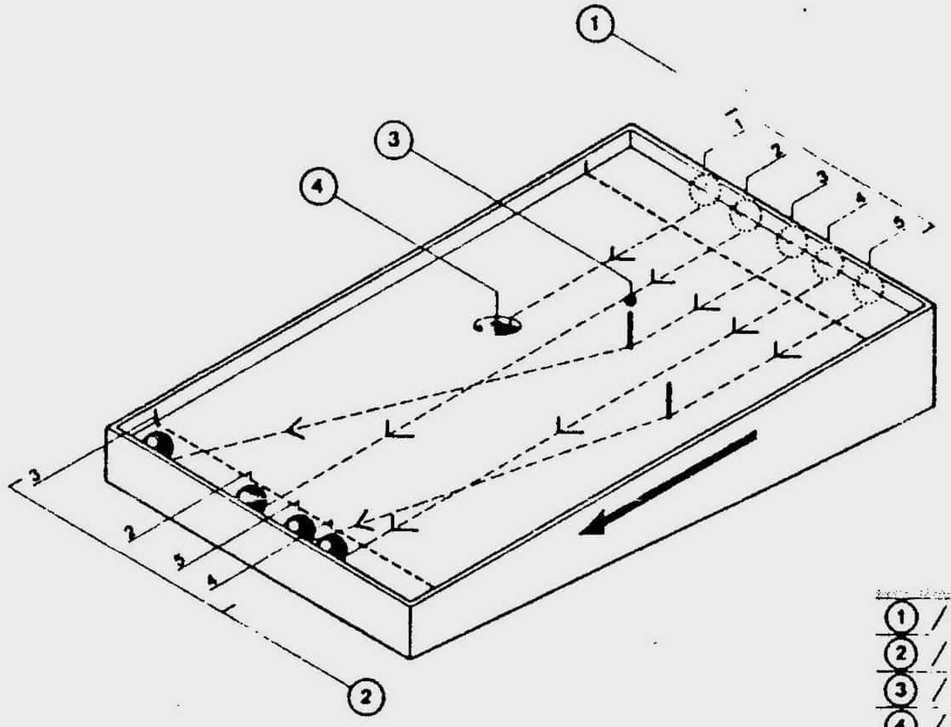
Debe insistirse en este punto que toda esta representación está despojada de aspectos teleológicos o de propósito racional por parte de la población. La estrategia óptima surge como resultado de fenómenos biológicos

Figura 1



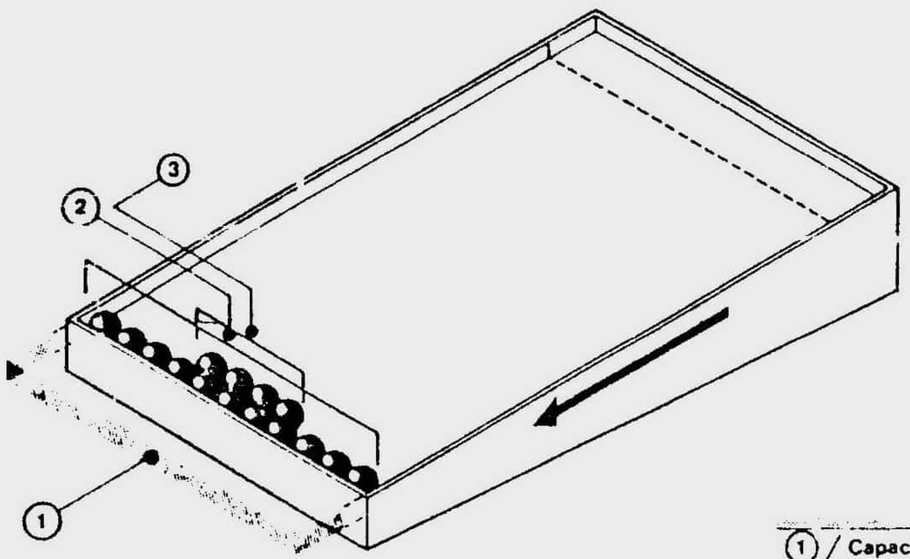
1 / Limite Superior / Nacimiento (Na.)
2 / Limite Inferior / Reproducción (Re)
3 / Medio Ambiente

Figura 3



1 / Orden Salida
2 / Orden Llegada
3 / Obstáculo No Letal
4 / Obstáculo Letal

Figura 4



1 / Capacidad de Carga
2 / Siguen en el Juego
3 / Fuera del Juego (Muertas)

Figura 5

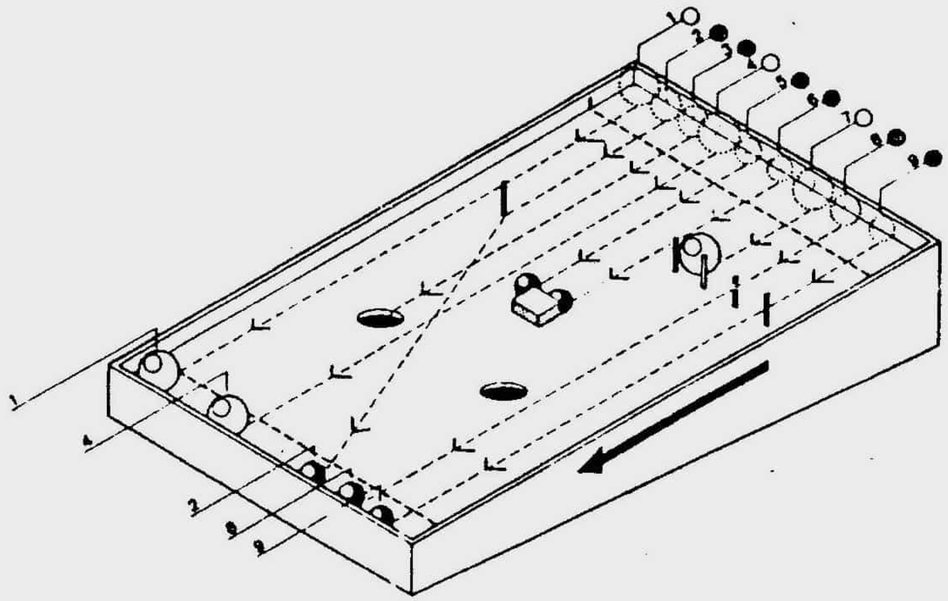
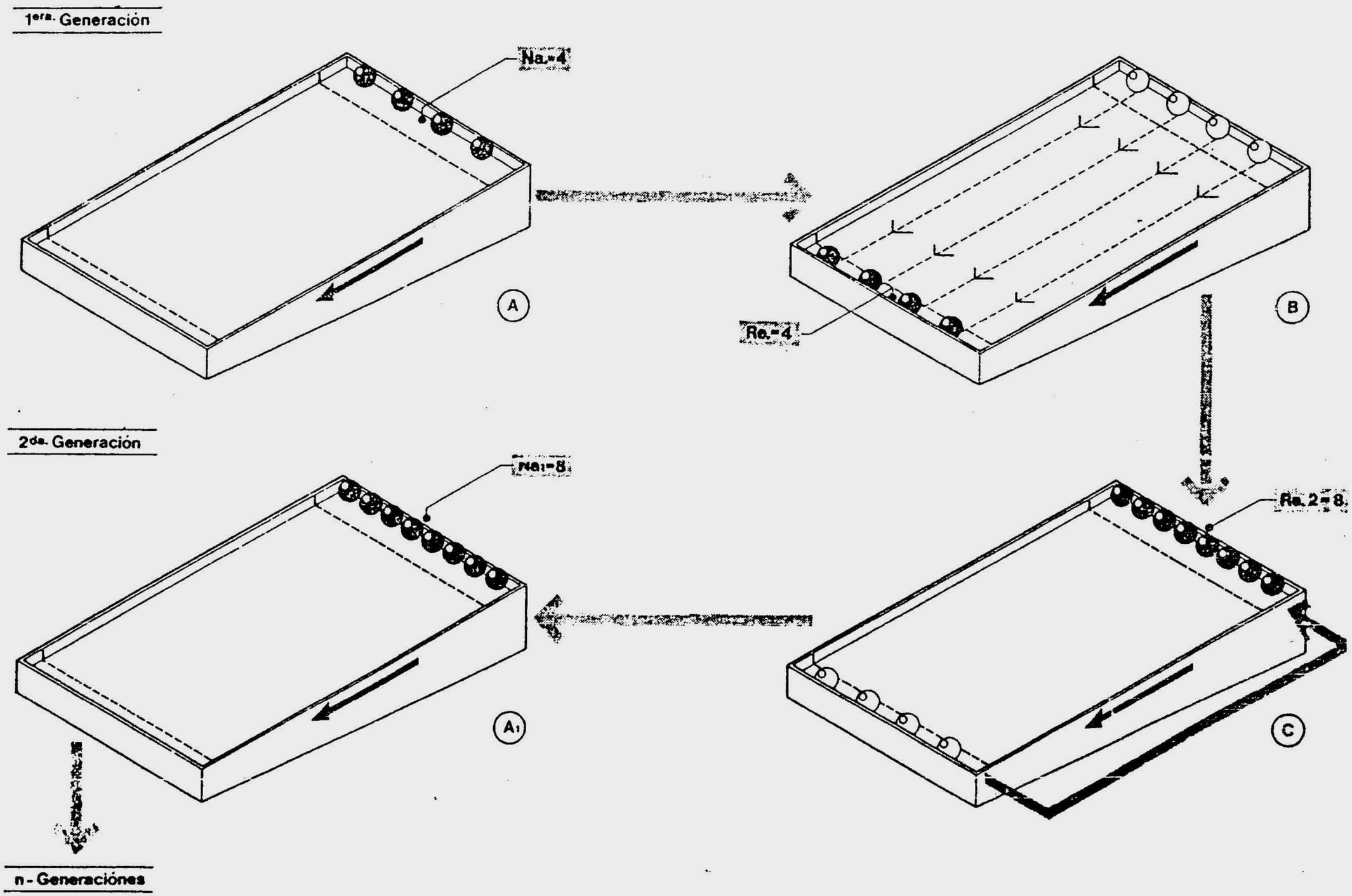


Figura 4


1era. Generación
Na.=4
A
Re.=4
B
2da. Generación
Na1=8
A1
Re.2=8
C
n - Generaciónes

que nada tienen que ver con lo volitivo, como queda claro a través del funcionamiento analógico del modelo.

Cada 6 generaciones (este número depende de la cantidad de esferas en juego) se reemplaza una de las que se reproducen, por una sacada al azar de un contenedor de esferas de muy diversos tamaños, colores, etc.; esto representaría las mutaciones.

Hasta ahora hemos imaginado que la reproducción era asexual. La reproducción sexual puede representarse, al exigir que para que una esfera se reproduzca debe llegar otra del mismo color al límite inferior que actúa como pareja de la anterior. Las esferas "hijas" pueden ser idénticas a sus "padres" o una combinación de caracteres de ambos, esto representaría en parte, la recombinación génica.

El aislamiento reproductivo está representado por la imposibilidad de la reproducción sexual entre esferas de distintos color.

Cada 10 ó 12 generaciones se puede hacer entrar a jugar una nueva esfera que representa las migraciones.

En algunos casos se pueden permitir el cruzamiento entre esferas de distintos colores y representaría la hibridación como fenómeno evolutivo: por ejemplo, una chica de metal con una grande de vidrio, dará una grande de metal.

El "ambiente" o plano inclinado puede dividirse en sectores diferentes en cuanto a la presencia de obstáculos y estos diferentes sectores pueden considerarse microambientes.

Luego de repetidas jugadas, se puede cambiar toda la población a otro ambiente que posea obstáculos diferentes al anterior. El "jugar" en este nuevo ambiente producirá un cambio sustancial en las proporciones de los tipos de esferas.

7. Construcción y uso del modelo mecánico

Sobre la base de las representaciones planteadas he construido un modelo material del juego población-ambiente.

El juego consiste en un plano inclinado de 120 cm de longitud y 35 cm de ancho dividido en tres ambientes (Figura 6).

La "población-jugador" está constituida por esferas de distintos diámetros, color y material (vidrio, metal y tergopol).

El ambiente 1 es heterogéneo con una trampa central consistente en 8 clavos que, por la distancia entre ellos, impiden el paso de esferas grandes. Hacia uno de los lados del ambiente existe un imán que es trampa para esferas de metal. En otro secotr del ambiente se encuentra una pequeña trampa para esferas grandes, construida con dos tacos de goma qué forman una suerte de embudo. Acompañan a las trampas dos obstáculos construidos con "gomas" que pueden cambiar la trayectoria de las esferas (obstáculos no letales).

El ambiente 2 es homogéneo y está cubierto en parte por orificios de 1 cm de diámetro que son trampas para esferas pequeñas.

El ambiente 3 es homogéneo y contiene 7 imanes (de posiciones cambiantes, si se quiere) que son trampas para esferas de metal.

El juego comienza en el ambiente 1 con una población ligeramente heterogénea de una 10 esferas. Se siguen las reglas establecidas en el capítulo anterior, y se llevan tablas que contengan la siguiente información por cada generación: número y tipo de esferas que "nacen", número y tipo de esferas que "mueren", número y tipo de esferas que se "reproducen", número y tipo de esferas que aparecen por mutaciones (en el caso en que las haya), número y tipo de esferas que se incorporen por migración o hibridación (en el caso que se produzcan) y, finalmente, cambio relativos en las proporciones de los tipos de esferas con respecto a la generación anterior. Debe anotarse también la generación en que se alcanza el número de esferas que representa la capacidad de carga del ambiente para la población en juego y las variantes que pueden producirse con respecto a esa capacidad de carga.

Una vez que se encuentra cierto equilibrio, es decir, que las proporciones de los distintos tipos de esferas cambian muy poco de una generación a otra, debe pasarse la población al ambiente 2. En este ambiente se llevan las mismas tablas que en el ambiente 1 y al encontrar el equilibrio se pasa al ambiente 3 donde se siguen las mismas instrucciones, retornando al final al ambiente 1.

8. Limitaciones y potenciales del modelo propuesto

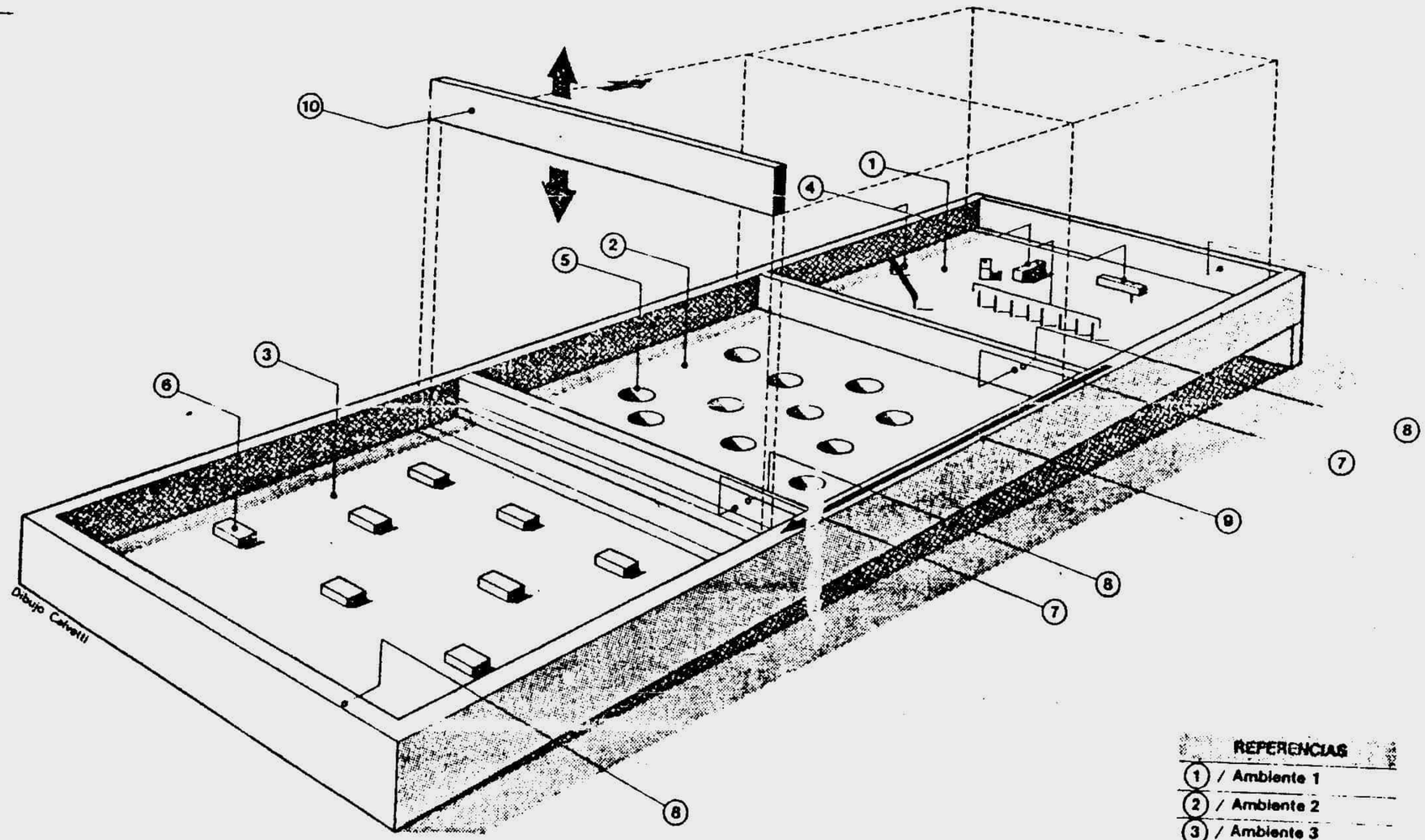
Cualquier modelo analógico exige prudencia en su planteamiento, pues se corren riesgos de interferencias falaces procedentes de aspectos no pertinentes, de distorsiones del modelo o de omisión de características importantes del original.

En nuestro caso, el modelo evolutivo propuesto presenta omisiones, como por ejemplo la falta de: el entrecruzamiento meiótico, la plasticidad fenotípica, la deriva genética y la selección indirecta. A mi entender, estas limitaciones reflejan, a su vez, potencialidades ya que son desafíos para crear elementos mecánicos representacionales de lo omitido. No obstante, debo destacar que estas limitaciones son superables en un modelo computacional.

Finalmente, debe quedar claro que la función de éste y de cualquier otro modelo analógico no es encontrar respuestas sobre la naturaleza sino proporcionar una hipótesis acerca de la estructura de la misma. En otras palabras, los modelos analógicos proporcionan hipótesis plausibles no demostraciones.

La conjunción juego-evolución es un paso más en favor de las ciencias que Caillois (1980:57) llamó diagonales pues: "...se superponen a las disciplinas antiguas y las obligan al diálogo. Intentan descubrir la legislación única que reúne fenómenos dispersos y en apariencia sin relación entre sí. Descifran complicidades latentes y descubren correlaciones descuidadas, efectuando en ese común universo cortes oblicuos. (...). Semejante red de atajos hoy parece cada vez más necesaria entre los puestos numerosos y aislados, esparcidos a lo largo de la periferia desprovista de líneas interiores por donde se desarrolla la fértil indagación."

Figura 6



REFERENCIAS
1 / Ambiente 1
2 / Ambiente 2
3 / Ambiente 3
4 / Trampas A.1
5 / Trampas A.2
6 / Trampas A.3
7 / Nacimiento
8 / Reproducción
9 / Tiempo
10 / Compuerta

9. Agradecimientos

Agradezco a la Doctora Analía A. Lanteri, a los Licenciados María M. Cigliano, María J. Forziano, Lucía D. Galotti y a la profesora Sheila Forziano la lectura crítica del manuscrito.

Asimismo agradezco al técnico Víctor H. Calvetti (Miembro de la Carrera del personal de apoyo a la investigación del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de la Argentina) el diseño y realización gráfica de las ilustraciones.

10. Bibliografía citada

Boughey, A.S. 1973. Ecology of Populations. The MacMillan Company, New York.

Bunge, M. 1972. Teoría y Realidad. Ediciones Ariel, Barcelona.

Caillois, R. 1980. Intenciones. Editorial Sur, Buenos Aires.

Davis, M. D. 1971. Teoría del Juego. Alianza Editorial, Madrid.

Dobzhansky, T.: F.J. Ayala, G. L. Stebbins y J. W. Valentine. 1980. Evolución. Ediciones Omega, Barcelona.

Hansell, R.I.C. 1980. Game theory and evolution: an overview. Evolutionary Theory. 4(6): 241-248.

Huizinga, J. 1950. Homo LUdens. a study of the play element in culture. Beacon Press, Boston.

Grant, V. 1977. Organismic Evolution. W. H. Freeman and Company, San Francisco.

Lewontin, R.C. 1961. Evolution and the theory of games. J. Theoret. Biol. 1: 382-403.

Lewontin, R.C. 1978. La adaptación. Investigación y Ciencia 26: 138-149.

Maynard Smith, J. 1978. La evolución del comportamiento. Investigación y Ciencia 26: 116-126.

Maynard Smith, J. 1982. Evolution and the Theory of Games. Cambridge University Press, London.

Pospielov, D.A. 1967. Teoría de Juegos y Autómatas. Siglo Veintiuno Editores, México.

Schelling, T.C. 1960. The Strategy of Conflict. Harvard University Press, Cambridge.

Slobodkin, L.B. 1964. The strategy of evolution. Am Scient. 52: 342-357.

Slobodkin, L.B. 1968. Towards a Predictive Theory of Evolution. In R.C. Lewontin (ed.) Population Biology and Evolution. Syracuse University Press, Syracuse.

Slobodkin, L.B. & A. Rapoport. 1974. An optimal strategy of evolution. Quart. Rev. Biol. 49 (3): 181-200.

Solbrig, O.T. & D.J. Solbrig. 1979. Population Biology and Evolution. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass.

Stebbins, G.L. 1978. Procesos de la Evolución Orgánica. Editorial Prentice Hall Internacional, Madrid.

Toledo, V.M. 1972. La evolución: un juego existencial. Biología. 3: 20-24.

impreso en los talleres Gráficos del Sur en el mes de marzo de 1985, edición amparada en el articulo 79 de la ley 13.349, depósito legal N° 151.247/85.

Copyright by CEDO.

NOTAS

(2) pag. 1. Es necesario destacar que descarto todo tinte teleológico o de propósito al comportamiento evolutivo de los organismos. La palabra "solución" está utilizada aquí sin las connotaciones de racionalidad que conllevan en el contexto humano.

(3) pag. 1. El modelo mecánico puede traducirse a un lenguaje computacional y, por lo tanto, podrían simularse los mismos fenómenos en una computadora.

(4) pag. 2. La población es un conjunto de organismos que ocupan un área geográfica delimitada, con un considerable número de caracteres compartidos, un origen común y (en organismos con reproducción sexual) sin barreras que impidan el cruzamiento entre los miembros del conjunto.

(5) pag. 4 Algunos autores (e.g.Maynard Smith, 1978, 1982) consideran que la lucha en el seno de una especie de animales territoriales puede ser vista como un juego competitivo entre organismos. A diferencia de nuestro planteamiento, los jugadores de ambos lados son organismos.

(6) pag. 4 **Las jugadas del ambiente son aleatorias en el sentido que la "estrategia" del ambiente es independiente de la jugada que haya realizado la población.**

FE DE ERRATAS

página	columna	renglón	donde dice	debe decir
1	2	6	"solucionar"	"solucionaron"
3	2	15	jueces	juegos
3	2	51	ejemplificar	ejemplificar
5	2	1	siguientes	agentes
5	2	52	perjuidica	perjudica
	1	24	darí	daría
8	1	49	secort	sector
10	2	22	Scobodkin	Slobodkin